



EPA

BOLETÍN TÉCNICO

SELECCIONANDO UN SISTEMA DE ADSORCIÓN PARA COV: ¿CARBÓN, ZEOLITA, O POLÍMEROS?

C LEAN
A IR
T ECHNOLOGY
C ENTER



EPA-456/F-00-001
14 de mayo de 1999

BOETÍN TÉCNICO

**SELECCIONANDO UN SISTEMA
DE ADSORCIÓN PARA COV:
¿CARBÓN, ZEOLITA, O POLÍMEROS?**

Preparado por

*Clean Air Technology Center, CATC (MD-12),
Information Transfer and Program Integration Division
Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS)
U.S. Environmental Protection Agency (EPA),*

ACLARACIÓN

Este reporte ha sido revisado por la *Information Transfer and Program Integration Division* (División para la Transferencia de Tecnología e Integración de Programas) de la *OAQPS, EPA*, y aprobada para su publicación. La aprobación no significa que el contenido de este reporte refleja los puntos de vista y las políticas de la *EPA*. La mención de nombres de marca o productos comerciales es sin propósito de patrocinio o recomendación para su uso. Copias de este reporte están disponibles a través del *National Technical Information Service* (Servicio Nacional de Información Técnica) del *U.S. Department of Commerce* (Departamento del Comercio en EE.UU.), 5285 Port Royal Road, Springfield, Virginia 22161, número telefónico (800) 553-6847.

ANTECEDENTES

El *Clean Air Technology Center - CATC* (Centro de Tecnología de Aire Limpio en EE.UU.), sirve como un recurso en todas las áreas de tecnologías existentes y emergentes para la prevención y control de la contaminación del aire y provee acceso público a los datos e información acerca de su uso, efectividad y costo. Además, el *CATC* proporciona apoyo técnico, incluyendo acceso a las fuentes de información de la *EPA*, a dependencias gubernamentales y a otros, según sea la disponibilidad de recursos, en relación a la operación, mantenimiento y viabilidad técnica y económica de estas tecnologías.

Acceso Público y Transferencia de Información

INTERNET / *World Wide Web Home Page* (Página Principal en la Red Mundial)
<http://www.epa.gov/ttn/catc>

Comunicaciones

Línea de Información *CATC* (en EE.UU.): (919) 541-0800 (Inglés)
Línea de Información *CATC/CICA* (en EE.UU.): (919) 541-1800 (Español)
Sin costo desde México (800) 304-1115 (Español)
FAX: (919) 541-0242
Correo electrónico: catc@mail.epamail.epa.gov

Fuentes de Datos

- ***RACT/BACT/LAER Clearinghouse (RBLC)***
Buscar, ver y bajar a disco datos relativos a
 - *Source Specific Technology Applications*
(Aplicaciones Tecnológicas para Fuentes Específicas)
 - *Air Pollution Regulatory Requirements*
(Normatividad Aplicable a Contaminantes del Aire)
- **PRODUCTOS DEL *CATC***
Bajar a disco los reportes técnicos, información de costos y programas

Programas y Centros Relacionados

CICA - Centro de Información sobre Contaminación del Aire para la Frontera entre EE.UU. y México (*U.S.-Mexico Border Information Center on Air Pollution*)

SBAP- *Small Business Assistance Program* (Programa de Asistencia a Negocios en Pequeño)

International Technology Transfer Center for Global Greenhouse Gases (Centro Internacional de Transferencia de Tecnología para Gases de Invernadero Global)

RECONOCIMIENTOS

Este boletín técnico fue posible gracias a los esfuerzos diligentes y persistentes de Lyndon Cox, *Senior Environmental Employee* (Empleado Ambientalista de Nivel), del *CATC*. Lyndon realizó un trabajo excepcional identificando fuentes de información, recopilando datos relativos al tema y elaborando este boletín. El *CATC* también agradece la cooperación y los comentarios útiles y oportunos de los siguientes colegas revisores:

Madeleine Strum, del *Coating and Consumer Products Group, Emission Standards Division, OAQPS, Office of Air and Radiation, U.S. EPA* (Grupo de Recubrimiento y Productos del Consumidor, División de Normas de Emisión, Oficina de Planeación y Normas de la Calidad del Aire, Oficina de Aire y Radiación, Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.).

William Vatauvuk del *Innovative Strategies and Economics Group, Air Strategies and Standards Division, OAQPS, Office of Air and Radiation, U.S. EPA* (Grupo de Economía y Estrategias Innovadoras, División de Estrategias y Normas del Aire, Oficina de Planeación y Normas de la Calidad del Aire, Oficina de Aire y Radiación, Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.).

Carlos Nuñez, *Emissions Characterization and Prevention Branch, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. EPA* (Oficina de Prevención y Caracterización de Emisiones, División de Prevención y Control de la Contaminación del Aire, Laboratorio Nacional de Investigación de la Administración de Riesgos, Oficina de Investigación y Desarrollo, Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.).

Además, el *CATC* agradece a los individuos, compañías e instituciones que proporcionaron información sobre la tecnología de adsorción utilizada en la preparación de este boletín. Los colaboradores se incluyen en la sección de REFERENCIAS de este boletín.

CONTENIDO

TEMA	Página
¿QUÉ SON LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?	1
¿POR QUÉ SON IMPORTANTES LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?	2
¿CÓMO FUNCIONA LA ADSORCIÓN?	2
¿CÓMO SON ADSORBIDOS LOS CONTAMINANTES?	3
¿QUÉ ES LA DESORCIÓN?	4
¿QUÉ ES LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN?.....	4
¿CÓMO SELECCIONAR UN ADSORBENTE?	5
¿EXISTEN OTRAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO?	6
ZONA DE TRANSFERENCIA DE MASA	6
CAPACIDAD DE TRABAJO	8
PRESIÓN DE VAPOR	8
ADSORBENTES MÚLTIPLES	9
MODELOS DE ADSORCIÓN	9
INCENDIOS DEL LECHO	9
REGENERACIÓN DEL ADSORBENTE FUERA DEL SITIO	10
AFINIDAD	10
¿CÓMO PUEDEN REGENERARSE LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?	11
REGENERACIÓN POR OSCILACIÓN TÉRMICA	11
REGENERACIÓN AL VACÍO	12
CONCENTRADOR DE VAPOR	14
SISTEMAS DE ADSORCIÓN POR OSCILACIÓN DE PRESIÓN.....	16
¿ESTÁN DISPONIBLES LAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?	17
¿QUÉ EFICIENCIA DE CONTROL SE PUEDE ESPERAR?	18
¿QUÉ TIPO DE FUENTES PUEDEN UTILIZAR TECNOLOGÍA DE ADSORCIÓN?	18
¿CUÁNTO CUESTAN LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?	18
“DECISIONES, DECISIONES...”	22
ALGUNAS REFERENCIAS	25

FIGURAS

1. Distancia entre la Molécula y la Superficie	3
2. Energía Potencial contra Distancia	3
3. Movimiento de la ZTM con el Tiempo	7
4. Sistemas de Adsorción por Oscilación Térmica (regeneración con vapor)	11
5. Sistemas de Adsorción por Regeneración al Vacío	12
6. Separación en Cascada al Vacío	13
7. Concentrador de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	14
8. Adsorción por Oscilación de Presión	16

TABLAS

1. Costo de los Sistemas de Adsorción de Carbón por Oscilación Térmica (“regenerativa”)	21
---	----

Seleccionando un Sistema de Adsorción de Compuestos Volátiles Orgánicos (COV): ¿Carbón, Zeolita, o Polímeros?

Este reporte lo familiarizará con los problemas envueltos en la selección de un sistema de adsorción para su planta, compañía o corporación. Cada uno de los adsorbentes de carbón, zeolitas y polímeros, han sido utilizados para adsorber compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros contaminantes en el aire, a concentraciones relativamente diluídas (de decenas a miles de partes por millón por volumen), para controlar emisiones. Este reporte discute los problemas relacionados con decidir cuál adsorbente se va a utilizar, que tipo de sistema de adsorción seleccionar, y qué tecnología de control de emisión es correcta para su caso.

¿QUÉ SON LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?

Nos referimos a los sistemas con adsorbentes, no con absorbentes, porque el contaminante es adsorbido sobre la superficie (principalmente por la superficie interna) de un gránulo, perla o cristal de material adsorbente. No es absorbido por medio de reacción química. Esta es una diferencia importante. El material adsorbido es retenido físicamente sin demasiada fuerza y puede ser liberado (desorbido) de modo relativamente fácil ya sea por calor o al vacío. Por el contrario, un absorbente reacciona químicamente con la sustancia que está siendo absorbida y de esta manera retiene la sustancia absorbida mucho más fuertemente, requiriendo mucha más energía para liberarla.

Desafortunadamente, uno de los adsorbentes es llamado “carbón absorbente”. Esta persistente confusión proviene de antes de los años veinte, cuando la adsorción llegó a entenderse. Un término más apropiado es el de “carbón activado”. El carbón se activa por medio de la pirólisis del carbón mineral, la madera, la corteza de árbol, la cáscara del coco, etc., para eliminar todo el material volátil en forma de gas o vapor y dejar únicamente el carbón elemental. A continuación, este carbón también podría ser parcialmente oxidado para agrandar sus poros.

Otro adsorbente es la estructura cristalina de aluminosilicato conocida como “zeolita”, que posee poros de tamaño uniforme (también llamados ventanas), a través de toda su estructura de cristal. La estructura de cristal de los 118 tipos establecidos de zeolitas se determina por la relación de silicio a aluminio en el cristal cuando este cristal se forma. Toda la zeolita que ocurre naturalmente es hidrofílica (o sea, que posee una afinidad por las moléculas polares, tales como el agua) y contiene aluminio. La desaluminización de la zeolita natural la vuelve hidrofóbica (o sea, que posee afinidad por las sustancias no polares, tales como muchos COV). Las zeolitas se desaluminizan por medio del intercambio del aluminio por silicio sin cambiar la estructura del cristal.

La zeolita hidrofóbica también puede ser sintetizada en cristales desde 1 micra hasta 1 milímetro de diámetro y éstos pueden ser aglomerados en forma de gránulos más grandes y reducir su resistencia al flujo del aire. Puesto que la síntesis es costosa, por lo general se reserva para producir ya sea las zeolitas hidrofóbicas o catalizadores de zeolita con un tamaño específico de poro grande.

Los polímeros adsorbentes poseen poros formados durante su manufactura. Estos poros pueden variar desde macroporos hasta tamaños moleculares, pero los poros más pequeños son por lo general más grandes que los microporos de un carbón activado. Los polímeros se utilizan como gránulos o perlas y, como el nombre lo implica, son plásticos. Se ha observado que desorben más rápidamente que el carbón. Al igual que el carbón, no son considerados altamente selectivos con respecto a cuál COV van a adsorber, aunque cualquier polímero específico adsorberá a algunos COV mejor que a otros.

La selección del mejor adsorbente para cada situación no es sencilla. Hay varios problemas relacionados que discutiremos para familiarizarlo con los diferentes adsorbentes y sistemas.

¿POR QUÉ SON IMPORTANTES LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?

Los sistemas de adsorción han sido utilizados principalmente para controlar la emisión de COV. Típicamente, el control de emisiones de COV reduce las concentraciones desde un rango entre 400 y 2,000 partes por millón (ppm) hasta menos de 50 ppm. Actualmente, la tecnología de adsorción puede ampliar este rango de concentración de COV desde 20 ppm hasta una cuarta parte del Límite Inferior de Explosividad (LIE). En el extremo inferior de este rango, las concentraciones tan bajas pueden ser difíciles o muy caras como para ser controladas por alguna otra tecnología y ni por todos los adsorbentes. En el extremo superior del rango de concentraciones, los incineradores, los separadores por membrana y los condensadores, pueden ser económicamente viables cuando son utilizados en lugar de los sistemas de adsorción.

Además del control de emisión, un sistema de adsorción hace posible la recuperación de COV. La recuperación de un COV reutilizable o comercial puede contrarrestar significativamente el costo de controlar la emisión. Los sistemas de adsorción también pueden aumentar la concentración de COV, permitiendo que la destrucción por incineración o la recuperación por membrana o por condensador sean económicamente viables.

¿CÓMO FUNCIONA LA ADSORCIÓN?

Los COV son vapores condensables que parecen condensarse sobre la superficie del adsorbente. Cuando la superficie ha adsorbido casi todo lo que le es posible, el COV es desorbido como parte de la regeneración del adsorbente. Por lo general, al ser desorbidos, los vapores de COV se encuentran a una concentración más alta, después de lo cual el COV puede ser recuperado o destruido. Se podría generalizar que la función de todos los sistemas de adsorción es la captura de COV a partir de una concentración diluída y su liberación a una concentración más alta. Los

sistemas de adsorción también pueden ser considerados como separadores del flujo de COV y del flujo de aire de un proceso.

La concentración real del COV es la clave para determinar cuándo y cómo se va a utilizar un sistema de adsorción. Un sistema de adsorción se vuelve casi inútil cuando la concentración a la entrada disminuye tanto que el COV no será adsorbido efectivamente, pero permite que la recuperación del COV sea a una concentración alta. Por razones de seguridad se indica que las concentraciones de COV se mantengan por debajo de la cuarta parte del LIE. Cuando la concentración está cerca de una cuarta parte del LIE, se puede disponer económicamente del COV por medio de un incinerador, capturar por una membrana, o recuperar con un condensador. Sin embargo, una concentración por debajo de una cuarta parte del LIE es demasiado baja para sustentar la combustión sin añadir un combustible auxiliar. Por lo tanto, a medida que la concentración de COV a la salida del adsorbente desciende por debajo de una cuarta parte del LIE, se debe añadir más combustible para proporcionar una combustión adecuada al COV en un incinerador.

¿CÓMO SON ADSORBIDOS LOS CONTAMINANTES?

En la figura 1 se muestra una molécula sobre una superficie, a la distancia a la que normalmente se encuentra de dicha superficie. Existe una repulsión entre la nube de electrones en los átomos que forman la superficie y los de la molécula y existe además una fuerza de atracción nuclear de Van der Waals. La atracción nuclear tiene un radio de influencia mucho más corto, de manera que hay una distancia corta (por lo general de nanómetros), desde la superficie, donde existe un “vado” o “pozo” en la curva de energía potencial tal como se muestra en la figura 2. Las moléculas o los átomos que llegan a este “pozo”, son atrapados o “adsorbidos” por este “pozo” de energía potencial hasta que pueden obtener la suficiente energía cinética para escapar fuera del pozo. La energía cinética se convierte en energía potencial, tal como cuando uno brinca hacia arriba en contra de la gravedad. Por lo tanto, se debe añadir energía cinética para permitir que las moléculas escapen o se “desorban”. La energía cinética de las moléculas se manifiesta como temperatura; siendo más energética cuanto más caliente.

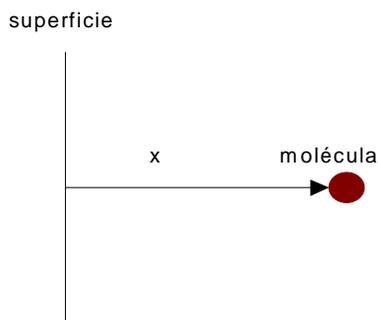


Figura 1. Distancia entre la Molécula y la Superficie

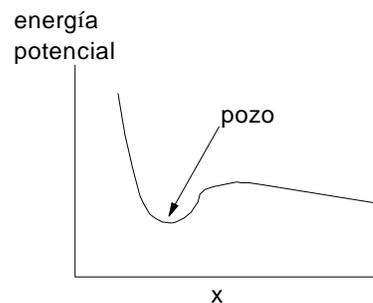


Figura 2. Energía Potencial vs. Distancia

Históricamente, el carbón fue el primer material en el que se observó que contenía una gran superficie con esta propiedad. Más recientemente, se ha observado que los adsorbentes de zeolita y de polímeros también poseen una gran superficie interna con esta propiedad.

Durante décadas hemos sabido que antes de poder obtener un alto vacío (tal como 1 micra de Hg), aún los sistemas de vidrio deben “desgasar” el aire adsorbido. Lo que distingue a estos adsorbentes, es que tienen una superficie tan grande (principalmente interna), con esta propiedad por unidad de peso y que puede ser desorbida sin dificultad.

¿QUÉ ES LA DESORCIÓN?

La desorción se logra a través de oscilaciones tanto de temperatura como de presión. De acuerdo a la teoría cinética de la materia, las moléculas ganan energía cinética cuando son calentadas y esto permite que una molécula calentada “vuele” fuera del pozo. El calor puede ser proporcionado por medio de vapor, nitrógeno calentado o por microondas, entre otras técnicas. Para la regeneración al vacío, la molécula tendrá en algún momento suficiente energía como para escapar, siempre que los choques entre las moléculas no la envíen de nuevo hacia el pozo. Por lo tanto, la desorción puede ser realizada ya sea calentando el material adsorbido o evacuando el espacio sobre él. Existe un equilibrio entre las moléculas atrapadas y las que escapan.

Impartirle al material adsorbido la energía cinética para escapar o desorber es parte de la regeneración del adsorbente. Esta regeneración debe ser llevada a cabo antes de que todo el adsorbente sea incapaz de retener más, y debe ser realizada antes de que el adsorbente pueda ser utilizado de nuevo. La otra parte de la regeneración es el secado, el enfriamiento o la preparación del adsorbente de alguna otra manera para adsorber de nuevo al COV.

¿QUÉ ES LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN?

Cada adsorbente tiene una capacidad de adsorción a la que se le conoce como “isoterma de adsorción”. Históricamente, con el carbón, la isoterma se utilizaba para medir las libras de contaminante por libra de adsorbente que podía ser adsorbida a una temperatura dada. Sin embargo, la isoterma de adsorción también es una función de la concentración del contaminante, medida por la presión parcial del vapor y es también una función de la presión ambiental total alrededor del adsorbente. El número de moléculas que pueden ser almacenadas en el “pozo” depende de la presión, correspondiendo a mayor presión un menor espacio entre las moléculas adsorbidas. La isoterma de adsorción todavía se define como las libras de material que pueden ser adsorbidas por libra de adsorbente.

Los sistemas de regeneración térmica utilizan la isoterma de temperatura; los sistemas de regeneración al vacío utilizan la isoterma de presión total y parcial; y los sistemas de regeneración por oscilación de presión utilizan la isoterma de presión ambiental total. La “isoterma” es realmente una función de todas estas variables. Por lo tanto, la “isoterma” es realmente una función compleja que forma por lo menos una superficie tridimensional, en vez de ser una constante o una gráfica de dos dimensiones. La isoterma puede ser una función ya sea

lineal o altamente no lineal, dependiendo del adsorbente, la presión, y el material que está siendo adsorbido.

La isoterma de adsorción también es una función de la cantidad de área de adsorción que pueden alcanzar las moléculas del COV. Los poros en la superficie permiten la entrada al área interior de cada uno de estos adsorbentes. Es en el interior donde existe la mayor área de adsorción. El carbón contiene poros que conducen a poros más pequeños, los que a su vez conducen a poros aún más pequeños. Esto aparentemente continúa *ad infinitum* en el carbón y la mayor parte de la superficie interna está en estos microporos. Las zeolitas tienen poros uniformes que son parte de su estructura cristalina. Los polímeros tienen poros dentro de un rango de tamaño, pero generalmente no tienen los pequeños microporos. Por tanto, la isoterma de adsorción es diferente para cada tipo de adsorbente y cada tipo de contaminante.

¿CÓMO SELECCIONAR UN ADSORBENTE?

Existen muchos tipos de polímeros adsorbentes, muchos tipos de carbón adsorbentes y muchos tipos de zeolitas adsorbentes. Documentar todas estas variaciones haría de este documento todo un tomo y lo convertiría en un manual de operaciones en vez de un documento de conceptos. No tenemos la intención de describir adecuadamente todas las variaciones con tanto detalle. Solamente podemos tratar acerca de las propiedades generales y permitir que las selecciones específicas sean hechas por los diseñadores y sus clientes con la ayuda de los manuales correspondientes.

De interés primordial es el tamaño molecular más grande a ser adsorbido contra el tamaño de los poros del adsorbente. Esto es particularmente importante con las zeolitas, en las que los poros uniformes pueden ser de cualquier tamaño, desde 3 hasta 30 Ångstroms (0.3 a 3 nanómetros), dependiendo del tipo de zeolita. No debe esperarse que las zeolitas proporcionen alguna área de adsorción para moléculas mayores que sus poros, ni para moléculas por las cuales no tengan afinidad. El carbón y los polímeros deben también tener poros más grandes que la molécula más grande a ser adsorbida. Sin embargo, debido al rango más amplio de tamaño de los poros en el carbón y los polímeros, este criterio es menos estricto de lo que es para la zeolita. El área de adsorción a ser alcanzada por vía de los poros no debe ser tomada en cuenta si la molécula a ser adsorbida no puede ni alcanzarla ni ser desorbida de ésta.

Independientemente del método de regeneración, el área de adsorción no puede ser regenerada cuando la molécula adsorbida brinca desde un pozo en un lado del poro hasta un pozo del otro lado del poro. Esto puede ocurrir en los microporos del carbón y de algunos polímeros. Esto evitaría la desorción de las áreas donde los microporos se vuelven demasiado pequeños.

La afinidad del adsorbente por algunos tipos de sustancias puede ser mucho mayor que la afinidad por otras. Como resultado, cuando hay una afinidad fuerte por algunas de las moléculas, las moléculas que tienen menor afinidad se retendrán con una menor capacidad de adsorción o serán liberadas en favor de las moléculas por las cuales la afinidad sea mayor. El carbón, el cual no es ni completamente hidrofóbico ni hidrofílico, retiene alguna superficie de adsorción con

afinidad tanto por las moléculas polares como por las no polares. Debido a esto, la humedad tiene un efecto perceptible sobre el carbón. Un artículo de investigación hasta reporta que la desorción de COV del carbón ocurre mientras el vapor se condensa y el agua desplaza al COV.

Todas las zeolitas que existen en la naturaleza son hidrofílicas, teniendo una afinidad por las sustancias polares tales como el agua, pero las zeolitas sintéticas pueden ser hidrofílicas o hidrofóbicas. Los polímeros son generalmente hidrofóbicos, a menos que sean producidos específicamente con otra afinidad. Por ejemplo, los bloques de copolímeros anfófilos pueden tener afinidades tanto hidrofílicas como hidrofóbicas. Por lo tanto, la afinidad debe ser considerada como parte de la selección de un adsorbente particular.

Algunos polímeros y las zeolitas hidrofóbicas son generalmente mucho menos sensibles a la humedad que los carbones y están también mucho menos sujetos a la posibilidad de incendio, desmoronamiento o pulverización. Por lo tanto, requieren ser reemplazados con mucha menor frecuencia. Los carbones son más baratos (al menos inicialmente). El costo por libra de carbón es de aproximadamente \$2.00 dólares de EE.UU., lo cual es hasta 20 veces menos que el costo por libra ya sea de los polímeros o de las zeolitas. Sin embargo, la necesidad de reemplazar las zeolitas es muy rara y el reemplazo de los polímeros ocurre con una frecuencia solo ligeramente mayor. El carbón necesita ser reemplazado desde cada seis meses hasta cada cinco años o cuando suceda algún incendio del lecho. La frecuencia depende del tipo de carbón, la frecuencia de la regeneración y de la temperatura a la cual se opera.

La desorción térmica de algunos polímeros adsorbentes fue evaluada por la compañía General Electric Co. y se observó que éstos desorben más rápidamente que el carbón, que tienen una mayor capacidad de adsorción ya sea a una humedad alta o baja después del acondicionamiento y que desorben a temperaturas más bajas. La temperatura máxima de desorción debe ser mayor que el punto de ebullición del COV, pero no debe exceder el punto de fusión del polímero.

La temperatura máxima de desorción es menos limitante para el carbón, el cual puede elevarse a temperaturas mucho más altas (121 a 177 °C) sin fundirse. Cuando la temperatura excede este rango, el carbón frecuentemente cataliza reacciones de oxidación. Para las zeolitas se usa comúnmente la misma temperatura máxima, pero el límite real depende ya sea de la temperatura de pirólisis, de la temperatura de catalización de los COV adsorbidos o del rango de temperaturas en el cual la estructura cristalina de la zeolita es estable. Se considera que este rango de temperaturas metaestables es por lo general de hasta aproximadamente 534 °C (1000°F).

¿EXISTEN OTRAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO?

¡SÍ! Estos otros factores se describen individualmente a continuación:

ZONA DE TRANSFERENCIA DE MASA

La zona de transferencia de masa (ZTM), véase la figura 3, existe en todos los adsorbentes. En la ZTM, la concentración de COV en el aire va desde el 100% de concentración de vapor a la

entrada hasta la menor presión de vapor disponible en equilibrio con el adsorbente desorbido.

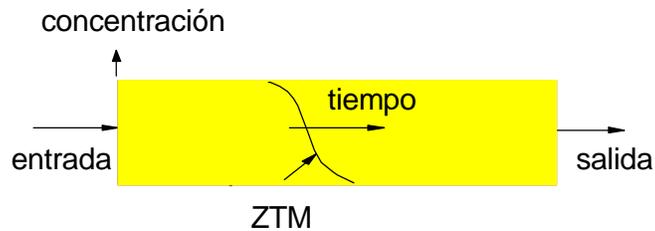


Figure 3. Movimiento de la ZTM con el Tiempo

La profundidad del lecho es la dimensión del adsorbente en la dirección del flujo del aire y la ZTM es por lo general mucho más corta que la profundidad del lecho. La ZTM se mueve a través del lecho a medida que el lecho alcanza su capacidad (se llena la isoterma de adsorción). Corriente arriba de la ZTM, el lecho ha alcanzado su capacidad, mientras que corriente abajo, el lecho permanece esencialmente sin adsorber. La saturación ocurre cuando la ZTM llega al final del lecho de adsorbente, corriente abajo. La saturación se observa como una elevación en la concentración de vapor de COV que abandona el lecho, lo cual puede ocurrir a diferentes tiempos para diferentes COV.

Los adsorbentes de todos los tipos comparten una característica con las columnas utilizadas en la cromatografía de gases, puesto que éstas también utilizan la adsorción. En cada sistema, el material adsorbido se desorberá espontáneamente y emigrará corriente abajo con el flujo de gas. Esto es causado por el gradiente de presión, el cual es intencionalmente muy bajo cuando los sistemas de adsorción son utilizados como tecnología de control de emisiones y más bien alto, en las columnas de adsorción en la cromatografía de gases. Esta migración de contaminantes es por lo general lo suficientemente lenta que puede ser despreciada durante el control de las emisiones. Sin embargo, esta propiedad define un tiempo máximo absoluto para la adsorción antes de regenerar el lecho. La saturación es realmente un proceso gradual, porque el equilibrio entre la presión de vapor y el adsorbente está variando continuamente. De este modo, la saturación puede ser definida como cualquier elevación notable en la concentración del efluente.

La ZTM también emigrará hacia la saturación independientemente de la carga de COV. Un pico en la concentración de entrada de COV, junto con la migración de la ZTM, permitirá que el COV se distribuya y reducirá la concentración que será desorbida a la saturación. Un ejemplo de cómo pudiera un adsorbente utilizar la característica de migración de la ZTM, es en el flujo de aire de un extractor en una planta que maneja mercaptano. El gas natural es inoloro y se le añade mercaptano para crear una indicación por el olfato (olor) en caso de fuga. Si un derrame de mercaptano da lugar a emisiones en concentraciones mayores a una parte por billón, la gente podría olerlo y alarmarse porque pensarían que existe una fuga de gas. Por lo tanto, los extractores en los que se maneja el mercaptano están equipados con un adsorbente de tamaño adecuado. Este adsorbente captura cualquier vapor proveniente de derrames y, cuando la ZTM

emigra hacia la saturación, el mercaptano es liberado a una concentración más baja en este caso. Esto es debido a que no fué una emisión continua de mercaptano; el adsorbente no agotó su capacidad y por lo tanto, la saturación ocurrió a una concentración menor que el valor del umbral de detección del olor. Para este propósito, la desorción o la regeneración no son necesarias a menos que los derrames sean demasiado frecuentes.

CAPACIDAD DE TRABAJO

Los “ciclos de acondicionamiento” son el número de ciclos (usualmente alrededor de cinco), que se requieren para alcanzar una cantidad estable de adsorción y de regeneración. El carbón, después de alcanzar los ciclos de acondicionamiento, es capaz de adsorber alrededor del 50% de la cantidad que fué adsorbida por el material virgen. Las zeolitas son capaces de adsorber alrededor del 90% de la cantidad adsorbida por el material virgen. Los polímeros pueden variar en el rango del 50% al 90%. Esta “isoterma acondicionada” también define la “capacidad de trabajo” del adsorbente. El hecho de que el carbón y algunos polímeros típicamente desorban sólo el 50% de lo que adsorbe el material virgen, se estima que sea debido a la recaptura continua de moléculas (ésto es, la reducción de la presión de vapor), en los microporos. El COV podría ser removido de estos microporos únicamente por medio de pirólisis, la cual destruiría el COV, además de que destruiría el polímero o alteraría las propiedades del carbón.

Las zeolitas tienen un tamaño de poros uniforme, por lo que no exhiben este fenómeno. Los polímeros tienen un rango más amplio de tamaños de poro y de cierta manera son similares a los carbones, pero se cree que algunos polímeros carecen de los pequeñísimos microporos. El carbón también muestra una distribución del COV en función del tiempo desde los macroporos hasta los microporos. Las zeolitas y los polímeros muestran esta distribución dependiente del tiempo en un grado mucho menos observable.

La “capacidad de trabajo” del adsorbente está determinada por la diferencia entre el nivel que tiene al regenerarse (desorbido), una vez acondicionado, y la isoterma de adsorción completa del adsorbente. Por tanto, el efecto del acondicionamiento debe ser considerado al determinar el tamaño del lecho de adsorbente. El efecto del acondicionamiento puede requerir hasta el doble de adsorbente en el lecho. Puesto que la regeneración debiera ocurrir solamente cada 8 o 16 horas de operación, la capacidad del (los) lecho(s) puede ser determinada por la concentración de COV, la velocidad del flujo de aire, el peso del adsorbente en el (los) lecho(s), el tipo de adsorbente y la “capacidad de trabajo” del adsorbente. De esta manera, la “capacidad de trabajo” puede tener un efecto significativo sobre el costo de la instalación, operación y mantenimiento de un sistema de adsorción.

PRESIÓN DE VAPOR

El carbón y los polímeros tienen una isoterma de adsorción lineal en relación a la presión de vapor, mientras que las zeolitas tienen una isoterma de adsorción bastante no-lineal en relación a la presión de vapor de las moléculas por las cuales tienen afinidad. Esta linearidad hace que el adsorbente, ya sea carbón o polímeros, sea el mejor cuando la presión de vapor (o la

concentración) es más alta; pero la falta de linealidad hace que la zeolita sea el mejor adsorbente cuando la presión de vapor (o la concentración), es más baja. Esta propiedad permite el uso de adsorbentes de carbón o de polímeros en un lecho “de sacrificio” (o primero), seguido, en la dirección del flujo del aire, por una zeolita apropiada en un lecho “pulidor”, para producir la presión de vapor de COV más baja en la corriente de salida. Mientras más baja sea la presión parcial de COV a la salida, más alta será la eficiencia de control.

ADSORBENTES MÚLTIPLES

Existe también una ventaja en el uso de una mezcla de adsorbentes. Una mezcla de carbón y de zeolita removió mejor una mezcla de vapores de xileno y metanol que un adsorbente constituido de cualquiera de los dos. Hussey y Gupta de las Industrias Gurr reportaron ésto en la Reunión del *American Institute of Chemical Engineers* (Instituto Americano de Ingenieros Químicos), en la primavera de 1997. Ellos observaron que la trayectoria a través de la mezcla era más larga que la trayectoria a través de cualquiera de los adsorbentes cuando se utilizaron por sí solos, y atribuyeron el aumento en la adsorción a la mayor longitud de la trayectoria. Sin embargo, tanto el metanol como el xileno fueron adsorbidos; y puesto que los autores declararon que los carbones adsorben bien al xileno mientras que una zeolita con un tamaño de poros de seis u ocho Ångstroms adsorbe bien al metanol, para producir este resultado, la profundidad debió haber sido la suma de las profundidades de los lechos individuales. En este artículo también se mencionó que a concentraciones altas, el carbón adsorbe mejor y puede ser utilizado como un lecho “de sacrificio” corriente arriba de un lecho “pulidor” de zeolita.

MODELOS DE ADSORCIÓN

Para determinar que tan bien funcionará el adsorbente seleccionado, el mismo debe ser sometido a una prueba con la mezcla de los contaminantes que se pretende adsorber y a las concentraciones que se espera tener. Esto debe realizarse ya sea si se usa únicamente un adsorbente o una combinación de adsorbentes. También debe llevarse a cabo para una mezcla de vapores de COV. Varios modelos de adsorción de multiespacios pueden predecir como adsorberá una combinación de COV, pero todos éstos están basados en las suposiciones que son válidas para los resultados del experimento en particular. Los ejemplos son de V. Gusev y J. O'Brien de la Universidad de Yale; C. Jensen y N. Seaton de la Universidad de Cambridge; M. Heuchel de la Universidad de Leipzig. Debe comprobarse que los diferentes modelos de adsorción de multiespacios se aplican a su mezcla y concentración de COV y al adsorbente seleccionado.

INCENDIOS DEL LECHO

Toda adsorción es exotérmica; esto quiere decir que la adsorción desprende calor y causa una elevación de la temperatura. Esta propiedad ha sido utilizada para el almacenamiento de calor, pero no es deseable para la adsorción de COV. Se sabe que el carbón o los metales en el carbón, catalizan la oxidación de algunos contaminantes cuando el adsorbente está caliente, resultando en incendios del lecho que también consumen parte o todo el carbón. Esto es un riesgo cuando se

adsorben ciertos hidrocarburos (tales como las cetonas o las terpentinas), a temperaturas ambiente que son cercanas a aquéllas que causan que se oxiden los COV. Tal incendio puede alterar el tamaño de los poros del resto del lecho u oxidarlo hasta hacerlo cenizas. Estos incendios han sido suprimidos mediante la humidificación del aire, dejando un poco de agua en el lecho después de una regeneración con vapor y por el enfriamiento intencional del carbón. Los polímeros son generalmente utilizados a temperaturas que no ocasionan incendios en el lecho, pero esto debe ser comprobado. Las zeolitas no son inflamables, pero pueden catalizar la oxidación si la temperatura se eleva lo suficiente. El tamaño de los poros de las zeolitas no se afecta por las temperaturas que se tienen dentro del rango metaestable. Normalmente, en el caso de un incendio del lecho con zeolitas, solo se perderían los COV si el flujo del aire se controla para limitar la temperatura. Si la temperatura se eleva por sobre el rango metaestable, el tamaño de los poros de la zeolita será reducido y la densidad de la misma se incrementará.

REGENERACIÓN DEL ADSORBENTE FUERA DEL SITIO

Algunos clientes utilizan la regeneración del carbón fuera de sitio. Por ejemplo, algunas tintorerías con lavado en seco utilizan esta técnica. Reemplazan los cilindros de carbón en vez de regenerarlos dentro de sus instalaciones. Esto implica determinar si Usted prefiere las molestias de una caldera, del combustible y del costo de la mano de obra que ésto significa (o por otro lado, la bomba de vacío y el condensador refrigerado), o está dispuesto a pagarle a otros para que regeneren el adsorbente por Usted. Hablando en términos de costos, mientras la regeneración por otros le ahorra el gasto directo de una caldera y su operación (o de una bomba de vacío y su operación), la planta regeneradora le hará un cargo que cubrirá todos los costos, más la mano de obra, la recolección, la reposición, la regeneración, la disposición y las utilidades. Este cargo debe ser menor por cliente cuando se prorrata através de una base de clientes que cuando lo absorbe una compañía por sí sola. Una capacidad compartida distribuiría el costo. Sin embargo, si su carga de adsorbente es lo suficientemente grande, le debería costar menos poseer su propia capacidad de regeneración.

AFINIDAD

La afinidad entre el adsorbente y los COV a ser adsorbidos debe ser considerada. Si la afinidad por una molécula en el flujo de contaminantes es suficientemente mayor que la afinidad por alguna otra, entonces el adsorbente adsorberá preferencialmente la molécula por la cual tiene la mayor afinidad y permitirá que ocurra el transporte de la otra hasta a una velocidad tan alta como la del flujo del aire. Por tanto, el lecho corriente arriba de la ZTM se saturaría con la molécula por la cual el adsorbente tuviera la mayor afinidad (suponiendo que el tamaño del poro lo permitiera), mientras que las otras moléculas de menor afinidad con el adsorbente pasarían más hacia adelante através del lecho y finalmente hacia la salida. A medida que la ZTM se mueve através del lecho, causaría la liberación de las moléculas con menor afinidad, mientras que adsorbería las moléculas por las cuales tiene mayor afinidad.

¿CÓMO PUEDEN REGENERARSE LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?

Existen tres métodos de regeneración: Regeneración por Oscilación Térmica, Regeneración al Vacío, y Adsorción por Oscilación de Presión. Discutiremos cada una de éstas por separado.

REGENERACIÓN POR OSCILACIÓN TÉRMICA

El sistema tradicional de adsorción con carbón utiliza vapor para elevar la temperatura del COV adsorbido y evaporarlo del carbón después de que éste ha adsorbido el COV. A esto se le ha llegado a conocer como un sistema de regeneración por oscilación térmica. Se le llama así, porque durante la regeneración la temperatura generalmente oscila entre la del ambiente y los 121° a 177 °C.

Un sistema de regeneración por oscilación térmica se muestra esquemáticamente en el diagrama de la figura 4. El vapor en el aire es transportado hacia una de las unidades adsorbentes (se muestran dos, pero pueden utilizarse un mayor número de ellos), mientras la otra es regenerada. El vapor fluye hacia la unidad que está siendo regenerada para calentar el adsorbente y de esta manera desorber el COV. Después de que el COV es desorbido, en vez del vapor se deja entrar aire de enfriamiento generado por un ventilador. Cuando el adsorbente se ha enfriado y secado hasta el nivel deseado, la capacidad de adsorción “acondicionada” se ha restaurado y el lecho ya está regenerado.

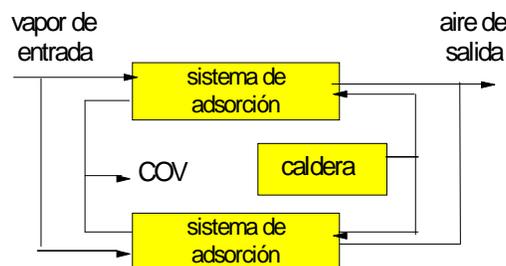


Figura 4. Sistema de Adsorción por Oscilación Térmica
(regeneración con vapor)

La regeneración ocurre en un tiempo predeterminado si la concentración promedio de COV está dentro de los parámetros de diseño. Sin embargo, si el flujo del aire o la concentración varían impredeciblemente, debe utilizarse un sensor. Un flujo del aire y una concentración predecibles permitirían que ocurriera la regeneración en un tiempo dado, antes de que ocurriese la saturación. Si el cronómetro estuviera ajustado correctamente, se evitaría cualquier emisión por saturación. Se debe utilizar un sensor para controlar la regeneración ya sea que el flujo del aire o la concentración de COV sean impredecibles o que el cronómetro sea ajustado incorrectamente.

Previo a la saturación, la concentración de la emisión es realmente muy baja y el sensor tendría que detectar una lectura de concentración por encima de este nivel para iniciar la regeneración del lecho de adsorción. Aunque con un sensor se emitirá alguna concentración mayor de COV antes de que ocurra la regeneración, esto pudiera permitir ya sea más emisiones (teniendo un umbral más alto) o menos emisiones (si el cronómetro permitiera que se llegara a la saturación), que con el uso de un cronómetro. Sin embargo, cualquier incremento en las emisiones pudiera realmente ser una cantidad trivial en comparación a la cantidad de las emisiones controladas. Tanto un cronómetro como un sensor pueden ser apropiados, si son ajustados y utilizados correctamente. Cualesquiera de los dos pueden ser inapropiados, si son ajustados y utilizados incorrectamente.

Históricamente, la regeneración térmica ha utilizado vapor, pero otras fuentes de calor han sido probadas con éxito. Estas incluyen: microondas, calentadores empotrados y nitrógeno calentado. Estas han sido utilizadas con todos los adsorbentes. La regeneración térmica se vuelve más práctica cuando los COV tienen presiones de vapor más bajas.

REGENERACIÓN AL VACÍO

Para aumentar la recuperación de solvente y eliminar la contaminación del COV con vapor, se puede utilizar un sistema de regeneración al vacío. La figura 5 muestra un esquema de un sistema de regeneración al vacío. Este utiliza una bomba de vacío para reducir la presión en el adsorbente por debajo de la presión de vapor del COV adsorbido, ocasionando que el COV se evapore a una temperatura ambiente dentro del adsorbente, en vez de que sea a una temperatura más alta. Durante el proceso de ebullición, la temperatura del adsorbente disminuirá realmente por debajo de la temperatura normal del exterior. Este método puede ser utilizado con adsorbentes de carbón, polímero, y zeolita.

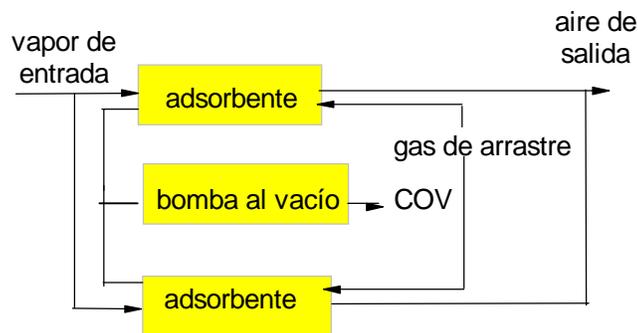


Figura 5. Sistema de Adsorción por Regeneración al Vacío

A veces se utiliza un pequeño flujo de gas de arrastre para mejorar el transporte del vapor de COV. El vapor de COV es entonces recuperado por separación (condensación, separación por membrana, compresión o algún proceso similar), del flujo proveniente de la bomba de vacío.

La pureza del COV recuperado no es afectada por el vacío, pero puede ser afectada por la mezcla de los vapores de COV o por la pureza del gas de arrastre. Si se tiene una mezcla de vapores de COV que estén siendo controlados, el COV recuperado será también una mezcla a menos que el tamaño de los poros o la afinidad del adsorbente o la temperatura de los condensadores separen los vapores. La pureza del gas de arrastre es importante especialmente cuando un COV soluble en agua, tal como un alcohol o una cetona, va a ser recuperado y el gas de arrastre contiene humedad. El vapor de agua será adsorbido y desorbido junto con el vapor de COV y el COV podría requerir una purificación subsecuente si va a reutilizarse. Se ha evitado la contaminación por humedad utilizando nitrógeno seco como gas de arrastre. El COV recuperado es de esta manera tan puro como el vapor de COV.

A veces los COV desorbidos son purificados por medio de destilación, decantación o separación por membrana. El COV recuperado es entonces reciclado en el proceso que lo liberó, utilizado en otra parte de la planta o vendido. Si la pureza del COV fuera demasiado baja para una recuperación económica, o el valor del solvente recuperado fuera demasiado bajo, el COV sería destruido en fase vapor. Las alternativas de un proceso apropiado de destrucción incluyen la oxidación sin flama, la incineración térmica o la incineración catalítica.

Cuando una unidad de adsorción de zeolita se divide en varios lechos fijos con flujo en cascada tal como se muestra en la figura 6; y cuando se utilizan gránulos de la zeolita apropiada, los diferentes tipos de vapores de COV pueden ser adsorbidos en lechos separados. Las compañías europeas ya han adoptado lechos fijos de zeolita. Esta aceptación pudiera estar basada en el hecho de que Europa y Asia son fuentes primarias de zeolita natural.

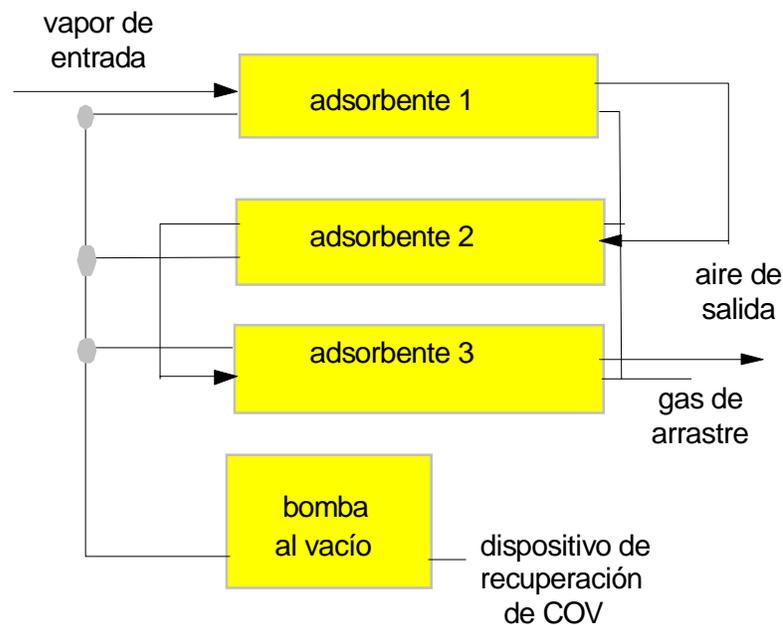


Figura 6. Separación en Cascada al Vacío

El COV puede ser entonces recuperado individualmente a partir de estos lechos y el COV resultante puede ser más puro que los vapores mezclados. La clave está en la selección de la zeolita. Aún cuando nadie anuncia en este momento la disponibilidad comercial de este sistema de adsorción con zeolita regenerada al vacío, se han realizado investigaciones que apoyan este sistema.

CONCENTRADOR DE VAPOR

Aunque históricamente las unidades de adsorción han sido utilizadas independientemente como un dispositivo para el control de la contaminación, también se cuenta con el concentrador de vapor. Con el concentrador de vapor se eleva la concentración del vapor de COV para disponer de un tratamiento más económico en los dispositivos de combustión o de condensación.

La relación típica de concentraciones (la concentración de COV a la salida dividida por la concentración de COV a la entrada), que puede ser obtenida con un concentrador de vapor puede pasar fácilmente de mil. Sin embargo, cuando la concentración real de un COV combustible está cercana a un cuarenteavo del LIE, uno puede justificar económicamente el uso de un concentrador rotatorio de vapor, el cual pudiera incluir un incinerador. En la figura 7 se muestra un concentrador rotatorio de vapor. Este es utilizado cuando el vapor de COV se encuentra en un gran flujo de aire y debe ser concentrado para que pueda ser incinerado económicamente. (El aire arrastre del concentrador es generalmente de alrededor del 10% del flujo de aire de entrada con un incinerador y por tanto la relación de concentraciones es de alrededor de diez. Por lo tanto, si la concentración inicial es de una cuarentava parte del LIE, la concentración resultante a la salida es de un cuarto del LIE. Esto significa que, para la incineración, se tendría que añadir un mínimo de combustible para asegurar suficiente valor calorífico para una incineración adecuada.

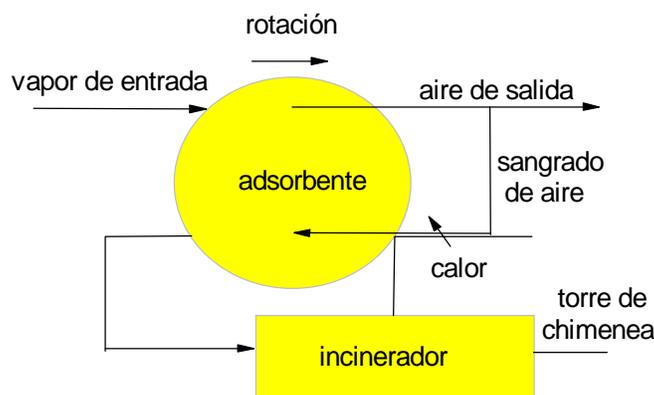


Figura 7. Concentrador de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)

El adsorbente es montado sobre un rueda que está rotando ya sea vertical u horizontalmente. Si la rueda está rotando alrededor de un eje horizontal, el aire fluye axialmente a través de los sectores de la rueda. Si la rueda rota alrededor de un eje vertical, el aire fluye radialmente a través de segmentos en el borde de la rueda. El adsorbente está localizado en lechos relativamente superficiales en los sectores o en los segmentos. El adsorbente puede ser una zeolita por sí sola, una mezcla de zeolita con carbón, una mezcla de zeolita con polímeros adsorbentes, o lechos adsorbentes ya sea de carbón o de polímero con lechos de zeolita corriente abajo.

Tal como se muestra en el diagrama del concentrador rotatorio de vapor, el aire de arrastre es calentado por el incinerador y el calor es entonces alimentado a un sector o segmento de la rueda rotatoria para regenerar el adsorbente. Este sector o segmento es aislado por medio de sellos que permiten que el COV sea recapturado y enviado al incinerador a una concentración mayor que aquella presente en el flujo de aire a la entrada. Esto permite que el COV tenga un mayor valor calorífico por pie cúbico y, por lo tanto, se requiera menos combustible adicional para elevar la temperatura a un nivel donde la eficiencia de destrucción o de recuperación (EDR) del incinerador sea mayor del 98%. El COV es incinerado para proporcionar calor al aire de arrastre para la regeneración del lecho adsorbente.

Una alternativa sería regenerar a una temperatura más baja y condensar los COV. La temperatura tendría que ser superior a la temperatura mínima para la regeneración del COV con ese adsorbente y tendría que incluirse el costo de la condensación con refrigeración. Esto utilizaría una “bomba de calor” para enviar el calor de condensación al aire de arrastre para desorber el COV. El hecho de que éste utilice sólo una décima parte del flujo de aire, reduce el costo de refrigeración. Ambas opciones están disponibles.

Por razones de seguridad, es importante que la concentración máxima permanezca por debajo de la cuarta parte del LIE, de manera que la relación de concentraciones deberá ser controlada para asegurar esto. Entre más se acerquen las altas concentraciones a la cuarta parte del LIE, menor combustible será necesario añadir para complementar el valor calorífico del COV. El límite de una cuarta parte del LIE lo imponen la *Occupational Safety and Health Administration -OSHA* (Administración de la Seguridad y Salud Ocupacionales en EE.UU.), y la *National Fire Prevention Association - NFPA*, (Asociación Nacional para la Prevención de Incendios), para prevenir incendios y explosiones.

Como resultado del uso del concentrador rotatorio de vapor, el incinerador puede ser mucho más pequeño, requiriendo solamente alrededor del 10% del volumen que de otra manera sería requerido para obtener un tiempo igual de residencia. El costo de un incinerador en el *OAQPS Control Cost Manual* (Manual de Control de Costos de la Oficina de Planificación y Normas de la Calidad del Aire de los EE.UU.), es proporcional a la velocidad del flujo de aire multiplicado por el tiempo de residencia elevado a una potencia ya sea de 0.25 o 0.55, dependiendo del tipo de incinerador. Por lo tanto, el uso del concentrador también genera ahorros en el costo del incinerador.

Se han desarrollado también concentradores de lecho fluidizado que son análogos al concentrador rotatorio de vapor. Se afirma que éstos son capaces de elevar la concentración del COV en el flujo de aire en más 10,000:1. Sin embargo, puesto que el carbón no es un adsorbente eficiente a concentraciones tan bajas de COV, las zeolitas o los polímeros pueden haber sido utilizados como adsorbentes o mezclados con el carbón, para permitir que una concentración tan baja fuera adsorbida. El uso de tal adsorbente podría relacionarse con reducciones de olor, en el que tales concentraciones bajas serían normales. El ciclo de operación es muy similar al concentrador de rueda rotatoria. Sin embargo, el ciclo se basa en la transferencia fluidizada del adsorbente desde el lecho de adsorción hasta la región de desorción. Este utiliza la velocidad de transporte del adsorbente contra la velocidad del flujo de aire para obtener la relación de concentraciones.

SISTEMAS DE ADSORCIÓN POR OSCILACIÓN DE PRESIÓN

En la figura 8 se muestra un diagrama esquemático de un sistema de adsorción por oscilación de presión. Este es utilizado para separar gases o vapores del aire, en base a que sus isotermas de adsorción son una función de la presión total, como también de la presión de vapor y de la temperatura. Es utilizado también para separar los contaminantes de los gases de combustión.

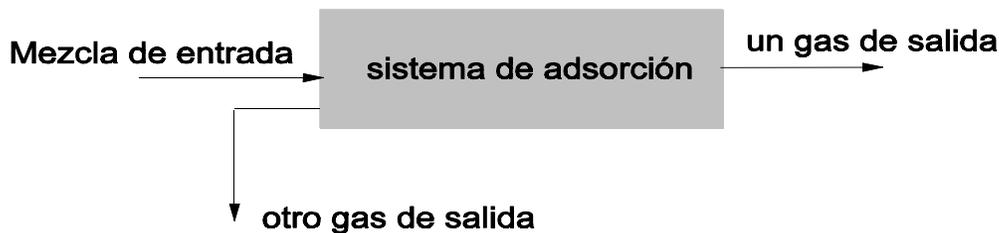


Figura 8. Sistema de Adsorción por Oscilación de Presión

La mezcla de los gases o vapores es admitida para presurizar a la unidad de adsorción, la cual contiene al adsorbente. Algunos gases son adsorbidos más rápidamente que otros y se utiliza la frecuencia de los ciclos para separarlos. En otros casos, un gas o vapor es adsorbido preferencialmente y la frecuencia de los ciclos es menos importante. Después de admitir la mezcla de gases, el gas que no es tan fuertemente adsorbido es descargado, lo que disminuye la presión a un nivel más bajo. Cuando este venteo de gas se interrumpe, la presión se reduce aún más para desorber el otro gas o vapor. Esto ha sido utilizado para separar oxígeno de aire,

bióxido de carbono de aire, bióxido de carbono de gases de combustión, bióxido de azufre de gases de combustión y vapores de gasolina de los tanques que descargan a la atmósfera. Es efectivo cuando el gas o vapor adsorbido preferencialmente tiene una concentración relativamente grande.

Por lo general, a esto no se le considera tecnología de control. Los vapores tienen que estar a concentraciones de decenas de miles de partes por millón, en comparación a los cientos o miles de partes por millón que son generalmente controlados como emisiones. Sin embargo, son utilizados en el control de los vapores provenientes de los orificios del desahogo en los tanques de almacenamiento de COV (tales como los de la gasolina).

¿ESTÁN DISPONIBLES LAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?

En el manual de control de costos de la *OAQPS*, la *EPA* tiene ecuaciones de diseño de unidades de adsorción de carbón por oscilación térmica. Estas ecuaciones son usadas en los programas para hojas de cálculos *Air Compliance Advisor (ACA)* y *CO\$T-AIR* (véase la sección de referencias). Las ecuaciones para el diseño de sistemas de adsorción de polímeros y de zeolitas y de otros tipos de sistemas de adsorción, todavía no han sido determinadas por la *EPA*, pero deberán ser análogos cuando se hayan tomado en cuenta las diferencias. Estas diferencias tienen que ver con el peso del adsorbente, la velocidad superficial del flujo de aire, el costo de un recipiente que pueda tolerar el vacío, etc.

Los diseñadores de un sistema de adsorción realmente desquitan lo que ganan. Ellos deben seleccionar el tipo de sistema para que sea compatible con el COV y con el propósito del sistema. Deben seleccionar (o ayudar a seleccionar), el adsorbente, el tamaño y número de lechos, la construcción del recipiente para cada lecho, el método de regeneración, el tiempo que la unidad debe utilizar antes de la regeneración (determinado por el flujo del aire y la concentración de COV), cuántos lechos deben ser utilizados en paralelo, la selección de una caldera o de una bomba al vacío, la instrumentación y controles que operarán a éstos en la secuencia apropiada en el momento apropiado y la localización y secuencia de tuberías y válvulas para la operación. Deben pues, ejecutar un diseño en el cual todas estas cosas funcionen en conjunto. Deben asegurar que el sistema de adsorción no alcance la saturación en un tiempo demasiado corto. Deben hacer que el sistema cumpla con las especificaciones del cliente y vigilar los costos y asegurarse de que éstos no sean excesivos.

Como resultado, deben estar familiarizados con el sistema que están diseñando. Este es el problema, puesto que cada diseñador seleccionará el sistema con el que está más familiarizado, a menos que sea absolutamente rechazado por el cliente. El sistema con el que todos los diseñadores están familiarizados es el sistema de adsorción de carbón por oscilación térmica, puesto que ha sido utilizado por varias décadas. Suelen no estar familiarizados con los sistemas de adsorción, técnicas de regeneración ni adsorbentes más nuevos. Estos sistemas, técnicas de regeneración y adsorbentes más nuevos, tienen marcadas ventajas sobre los antiguos.

¿QUÉ EFICIENCIA DE CONTROL SE PUEDE ESPERAR?

Uno puede esperar que un sistema de adsorción bien diseñado alcance entre el 95% y el 98% de eficiencia de control a concentraciones de entrada entre 500 y 2000 ppm en aire. Esto es independientemente de los sistemas posteriores a la unidad, tales como un incinerador o un condensador. Por lo tanto, la eficiencia de control de una unidad de adsorción y un incinerador combinados pudiera ser:

eficiencia de la unidad de adsorción x eficiencia del incinerador = 95% x 98% = 93.1%

mientras que la eficiencia de una unidad de adsorción y un condensador combinados pudiera ser:

eficiencia de la unidad de adsorción x eficiencia del condensador = 95% x 99% = 94.05%

La eficiencia real de control de ambos, la unidad de adsorción y el dispositivo posterior, están relacionadas. Ni la eficiencia de la unidad de adsorción ni la eficiencia del dispositivo posterior es más dominante, pero cualesquiera que tenga la menor eficiencia causará más pérdida en la eficiencia total.

¿QUÉ TIPO DE FUENTES PUEDEN UTILIZAR LA TECNOLOGÍA DE ADSORCIÓN?

Las emisiones de COV y de contaminantes peligrosos del aire pueden ser controladas, recuperadas, recicladas o concentradas para su tratamiento posterior por medio de la tecnología de adsorción. Esto incluye las emisiones de actividades tales como: tintorerías, desengrasado, pintura con pistola de aire, extracción con solventes, recubrimiento de lámina metálica, revestimiento con papel o con película de plástico, imprenta, farmacéuticos, hule, linoleo y envoltura transparente. Cualquier proceso que genere emisiones de COV a concentraciones bajas (tan bajas como 20 ppm), a flujos de aire relativamente altos (mayores de 5,000 piés cúbicos por minuto), debe considerar la tecnología de adsorción para concentrar el COV en la corriente de emisión, antes del tratamiento final, y el reciclaje o la destrucción.

¿CUANTO CUESTAN LOS SISTEMAS DE ADSORCIÓN?

Los procedimientos, los datos, y las ecuaciones para calcular el tamaño y estimar los costos de capital y anuales de los sistemas de adsorción de carbón por oscilación termal (“regenerativa”), están dados en el Manual de Control de Costos de la *OAQPS* (5ª edición, febrero de 1996). Para conveniencia de los usuarios, estas ecuaciones del Manual de Control de Costos de la *OAQPS* han sido incorporadas a las hojas de cálculos para el control de costos de *COST-AIR* y el programa de *Air Compliance Advisor*, que pueden ser bajados a disco de la página del Internet del *CATC*. Debemos enfatizar sin embargo, que estas ecuaciones proporcionan estimaciones de costos de “estudio” (exactitud de $\pm 30\%$), únicamente para aquellas unidades de adsorción que utilizan carbón activado. Los procedimientos para la estimación de costos de los sistemas de

adsorción en base a polímeros o zeolitas tienen que ser desarrollados aún por la *EPA*. Quienes estén interesados en éstos últimos deberán ponerse en contacto con uno o más vendedores de estos sistemas. (Véase la extensa lista de vendedores al final de este boletín).

Los costos para los sistemas de adsorción de carbón dependen de una variedad de parámetros de las instalaciones, normativos y de costo. Por esa razón, no se pueden desarrollar “reglas de dedo” que tengan sentido. Los parámetros relativos a las instalaciones incluyen, primeramente, las características de los contaminantes y del gas emitidos-- la velocidad del flujo volumétrico, la temperatura, la presión, la composición de COV, la carga de COV y el contenido de humedad y de particulados. Otro parámetro importante es el estado de las instalaciones, ésto es, si son nuevas o ya existentes. En un local ya existente, el costo de instalación del equipo de adsorción será típicamente alto. La diferencia entre este alto costo de instalación y el costo de instalación del mismo sistema de control en un local nuevo es llamado “la sanción por la actualización”.

Dependiendo de cómo esté especificado en los reglamentos, el parámetro normativo más pertinente puede ser la concentración especificada de COV a la salida o la eficiencia de control de la unidad de adsorción correspondiente que se requiere para satisfacerla. Los parámetros para calcular el tamaño incluyen el material de construcción (el acero inoxidable 304 es el típico para los sistemas de adsorción de carbón), la cantidad de aislante, la caída de presión, la capacidad de trabajo del adsorbente y si el sistema será ensamblado en fábrica (“en paquete”) o construído en el sitio (“a la medida”).

Uno de los parámetros de diseño más importantes es el tiempo de adsorción. Este tiempo se suele seleccionar de modo que sea compatible con los programas de producción. Por ejemplo, un sistema de adsorción controlando una operación de imprenta que opera en turnos de ocho horas, podría tener un tiempo de adsorción de ocho horas. Al final de cada turno, el (los) lecho(s) de adsorción sería regenerado a tiempo para ser puesto en la línea de nuevo antes de que se inicie el siguiente turno. Obviamente, a medida que el tiempo de adsorción aumenta, también lo hace la cantidad de adsorbente requerida y, por tanto, el tamaño, número y costo de los recipientes del sistema de adsorción. Pero aunque los tiempos de adsorción más cortos resultan en sistemas de adsorción más pequeños y en costos de capital más bajos, los costos anuales resultan más altos debido a que el adsorbente debe ser regenerado más frecuentemente. Esto se debe principalmente al mayor consumo de vapor (para la regeneración del lecho) y a la mayor demanda eléctrica (para el ventilador de secado y enfriamiento del lecho). Con la regeneración con vapor, el usuario tiene la opción ya sea generar el vapor en el sitio por medio de una caldera existente o de adquirir una caldera nueva dedicada a ese propósito. Como alternativa, el usuario podría optar por comprar el vapor de una fuente externa.

Las decisiones y las selecciones anteriores están dentro del dominio del usuario. Sin embargo, el usuario no tendrá que preocuparse con detalles tales como el cálculo del tamaño de las líneas de vapor, la selección del ventilador para el secado y enfriamiento del lecho, el diseño de los recipientes para el adsorbente, etc. Este tipo de especificaciones las determina el vendedor del

sistema de adsorción cuya experiencia en la aplicación y el conocimiento del proceso de adsorción son mucho más extensos.

El costo y los parámetros relacionados con el costo, tales como las horas de operación anuales, también influyen fuertemente en el “meollo del asunto”. Estos incluyen los precios del carbón, de la electricidad, del vapor, la mano de obra de operación y mantenimiento y la reposición del adsorbente (incluyendo el costo de mano de obra de la reposición), así como las tasas de interés y las vida útil del adsorbente y del resto del sistema de control. Uno de los parámetros de costo más críticos es el valor asignado al COV recuperado. Tal como lo ilustra el ejemplo que a continuación se presenta, si la cantidad del COV recuperado es lo suficientemente grande, su valor puede compensar los costos anuales, resultando inclusive en un excedente o crédito anual. Obviamente, este valor debe ser seleccionado cuidadosamente, teniendo en mente tanto el precio actual del COV en el mercado como la pureza de los compuestos orgánicos recuperados. A mayor pureza, mayor será el valor. (Para mayor información sobre éste y otros parámetros, refiérase al capítulo 4 (“Unidades de Adsorción de Carbón”), del Manual de Control de Costos de la *OAQPS*).

Considérese la siguiente ilustración hipotética. Cuatro operaciones de imprenta ya existentes, emiten tolueno (un solvente de las tintas), en cantidades lo suficientemente grandes como para atraer la atención de la agencia estatal para el control de la contaminación del aire. Los reglamentos de esta agencia para estas operaciones de imprenta requieren que el 98% del tolueno sea removido antes de que la emisión sea venteadada a la atmósfera. La operación más pequeña de estas cuatro emite 50 libras de tolueno por hora con un flujo de 5,000 piés³/min., mientras que la más grande emite 1,250 libras por hora con un flujo de 50,000 piés³/min. Las otras dos emiten 250 libras por hora cada una a 5,000 y 50,000 piés³/min., respectivamente. ¿Cuál sería el costo de capital y el costo total anual (CTA), de los sistemas instalados de adsorción de carbón con regeneración con vapor, para controlar el tolueno proveniente de estas operaciones?

En la tabla 1 se enumeran estos costos para cada uno de los cuatro sistemas de adsorción. Calculados por computadora por medio de una hoja de cálculos para sistemas de adsorción de carbón del programa *CO\$T-AIR*, estos costos reflejan los precios del equipo, carbón, servicios públicos, mano de obra y el tolueno, en el **segundo trimestre de 1998**. Las fuentes de precios consultadas, incluyeron el *Monthly Energy Review* del Departamento de Energía de los EE. UU. (electricidad y destilado de petróleo para la producción de vapor), la Oficina de Estadísticas Laborales de EE. UU. (mano de obra de impresión y publicación), y el *Chemical Marketing Reporter* (para el tolueno). (**Nota:** Todos los costos han sido redondeados a dos cifras significativas.).

Como podríamos esperar, los costos de capital aumentan con el incremento del flujo de aire y con la velocidad de emisión del tolueno. Los flujos más altos requieren recipientes de adsorción, decantadores, condensadores y otro equipo más grandes y más costosos. De la misma manera, a medida que la velocidad de la emisión aumenta, debe contarse con más carbón para la adsorción. Nótese que el costo de capital por unidad varía en el rango de los \$22 a los \$87 dólares por

pié³/min -- un factor de uno a cuatro. Este rango tan amplio desalienta el uso de tales generalizaciones para la estimación del costo de capital.

Flujo del Gas (pié ³ /min)	Tolueno Emitido (libras / hora)	Costo de Capital		Cost Total Anual (Crédito)	
		1,000 \$	\$ / pié ³ /min	1,000 \$ / año	\$ / millones de pié ³ /min
5,000	50	240	48	43	18
	250	430	87	(19)	(8.0)
50,000	250	1,100	22	110	4.6
	1,250	1,700	33	(280)	(12)

Table 1. Costo de los Sistemas de Adsorción de Carbón por Oscilación Térmica (“regenerativa”)

Entre otras contribuciones importantes a estos costos se incluyen las siguientes:

- * Horas de operación por año: 8,000
- * Tiempos de adsorción y desorción: 8 y 4 horas, respectivamente.
- * Temperatura del gas a la entrada: 25 °C.
- * Tasa de interés anual: 7%
- * Vida del equipo (en años): 10 (sistema de adsorción); 5 (carbón)

Sin embargo, el costo total anual (CTA) no varía de modo uniforme. Nótese que, para los sistemas de 5,000 pié³/min, el incremento de la velocidad de emisión de 50 a 250 libras por hora disminuye el CTA de \$43,000 dólares por año a un crédito neto de \$19,000 por año. Los costos anuales para los sistemas de 50,000 pié³/min se comportan de igual manera. Obviamente, el crédito por la recuperación del tolueno influye fuertemente en el CTA. Este crédito a su vez, depende de tres parámetros: la velocidad de entrada de la emisión, la eficiencia de control y el valor asignado a las sustancias orgánicas recuperadas. Los dos primeros parámetros serán esencialmente constantes para una fuente de emisión y un sistema de control determinados. Pero tal como se discutió anteriormente, el valor de recuperación esperado puede variar significativamente de acuerdo a las condiciones del mercado y, por esta razón, debe ser seleccionado cuidadosamente. Finalmente, el CTA unitario varía ampliamente, desde un crédito de \$12 dólares por millón de pié³/min tratados, hasta un costo de \$18 dólares por millón de pié³/min.

Como hemos demostrado, tanto el costo de capital como los costos totales anuales para estos sistemas hipotéticos cubren un amplio rango. Y recuérdese que estos costos varían tanto para los sistemas de adsorción que están removiendo el mismo COV (tolueno), emitido por el mismo tipo

de fuente (operación de imprenta), basados en parámetros de entrada idénticos (flujo de aire y la velocidad anticipada de emisión del tolueno). Considérese que la adsorción de otros VOC (y mezclas de VOC), podrían requerir mucho más o menos carbón; que otras fuentes podrían requerir tiempos de adsorción y desorción mucho más cortos o más largos y que los parámetros de entrada podrían ser enormemente diferentes bajo otros escenarios de control. Entonces, la única conclusión a la que podemos llegar con certeza acerca de los costos de los sistemas de adsorción de carbón – o, para el caso, los costos de *cualquier* tipo de sistema de control – es que no hay conclusión. Los precios se deben obtener de los vendedores, de los consultores o de los diseñadores.

Para los concentradores rotatorios de vapor, frecuentemente se utilizan zeolitas (ya sea con o sin otros adsorbentes), porque son más efectivas para la adsorción de concentraciones más bajas de COV. El costo de un sistema tal depende del flujo de aire y de la concentración de COV y está entre los \$1000 o \$1500 dólares por tonelada de COV destruido a 100 ppm, y los \$3,250 dólares por tonelada de COV destruido a 20 ppm, de acuerdo a Munters ZEOL.

DECISIONES, DECISIONES...

¿Tiene su proceso emisiones de COV? ¿Puede Ud. oler cuando su proceso está operando? Si es así, su proceso probablemente emite un COV y probablemente estas emisiones de COV deban ser controladas. ¿Exceden sus emisiones de 10 toneladas cortas por año (55 libras por día)? ¿Exceden sus emisiones las condicionantes de su licencia de operación? Cualquier respuesta positiva quiere decir que probablemente Ud. está emitiendo un COV que necesita de control. Si tiene alguna duda, pregunte a la agencia estatal o local que expide las licencias de operación. Con frecuencia (pero no siempre), los COV poseen entre 2 y 16 átomos de carbón. Los COV también reaccionan con óxido de nitrógeno (NO) en presencia de luz ultravioleta (luz solar), para multiplicar el NO₂, que a su vez crea ozono.

Si Ud. no está seguro si alguna emisión de su planta es un COV, llame al *EPA's Clean Air Technology Center - CATC* (Centro de Tecnología de Aire Limpio), al 919-541-0800, o póngase en contacto con el *CATC* por medio de FAX al 919-541-0242 o por correo electrónico a catcmail@epamail.epa.gov y se le referirá a alguien que le puede ayudar a determinar esto. También tenemos una página del *CATC* en el Internet en www.epa.gov/ttn/catc en caso de que prefiera ponerse en contacto con nosotros por esa ruta.

Si su proceso emite un COV en cualquier cantidad mayor de 20 libras por día, entonces debiera indagar sobre el tema de control de emisiones. Hemos visto varios anuncios en el Internet en *URLs* (direcciones de Internet) para diseñadores y fabricantes de sistemas de adsorción. También puede usar Ud. algún algoritmo de búsqueda y por lo general, los anuncios comerciales son los que aparecen primero.

Cuando se tienen que controlar emisiones de COV, se tienen que tomar varias decisiones:

1. ¿Se destruirá o se recuperará el COV? ¿Qué valor de reutilización tendrá? ¿Esto afectará el diseño del sistema y la economía de su operación? Quizás Ud. querrá investigar todas las opciones.
2. Si se van a recuperar los COV, ¿Qué tan puros deberán estar? ¿Qué costo se podría evitar al no comprar COV con la pureza que Ud. requiere? Si debe ser muy puro, debe decidir si va a destilar el COV después de la recuperación o la forma cómo pueda lograrlo.
3. Si la pureza no es necesaria ni posible y el COV no es soluble en agua, podrá hacerse uso de un condensador con un desnatador para separar los COV del vapor o de la humedad condensada.
4. Debe decidir si usará carbón, zeolita o polímeros como adsorbentes. Cada uno tiene sus ventajas y sus desventajas. Deberá tomar esta decisión preliminar con asesoría externa antes de contratar a un diseñador, porque los diseñadores diseñarán el tipo de sistema con el que están más familiarizados. Existen muchos diseñadores de sistemas de carbón con regeneración con vapor, porque este sistema ha estado disponible durante décadas, pero encontrará menos diseñadores y consultores disponibles para el diseño de los nuevos sistemas y adsorbentes.
5. Existen varias compañías que ofrecen concentradores de lecho rotatorios o fluidizados. Algunas de éstas son las siguientes: (Nota: La mención de estas fuentes no implica que las patrocinemos; y se sabe que esta lista está abreviada e incompleta.)

ABB Paint Finishing	1400 Stephenson Hwy.	Troy, MI 48099
Durr Environmental, Inc.	40600 Plymouth Rd.	Plymouth, MI 48170
Engelhard	101 Wood Ave.	Iselin, NJ 08830-0770
JWP AMCEC	2625 Butterfield Rd.	Oak Brook, IL 60521
Met-Pro Corp.	160 Cassel Road	Harleyville, PA 19438
Munters ZEOL	79 Monroe St P.O.Box 600	Amesbury, MA 01913-0600

6. Algunas otras fuentes para el diseño y/o construcción de sistemas de adsorción son las siguientes: (véase la nota anterior)

AMCEC Corp.	2525 Cabot Dr.Suite 205	Lisle, IL 60532
ACR Activated Carbon Resources Inc.		Westport, CT
American Air Filter	P.O.Box 35690	Louisville, KY 40232-5690
American Environmental Int'l	5 Revere Dr. Suite 200	Northbrook, IL 60062-9998
Aquest Corp.		Somers, NJ
Atochem Inc./CECA Division	266 Harristown Rd.	Glen Rock, NJ 07452
Barneby & Sutcliffe	P.O. Box 2526	Columbus, OH 43216
Baron-Blakeslee Inc.	2001 N. Janice Ave.	Melrose Park, IL 60160

COH Corp.	2000 Eastern Pkwy	Brooklyn, NY 11233
Calgon Carbon Corp.	P.O.Box 717	Pittsburgh, PA 15230-0717
Carbtrol Corp.	39 Riverside Dr.	Westport, CT 06880
DR Technology	Hidden Pines Drive	Clarksburg, NJ 08510
Dedert Corp.	2000 Governors Dr.	Olympia Fields, IL 60461-1074
Ducon Environmental Systems Co.	110 BiCounty Rd.	Farmingdale, NY 11735-3923
Envirotrol Inc.	432 Green St P.O.Box 61	Sewickley, PA 15143
Filcorp Industries		Milton, VT
FMG	P.O.Box 3043	Union Gap, WA 98903
Green and Green Associates		Lexington, MA
Hydrogroup Inc.	1011 Hwy 22	Bridgewater, NJ 08807
HCT Corp.	325 Lennon Lane Suite 200	Walnut Creek, CA 94598
HydroQuip, Inc.	63 N Washington St.	N. Attleboro, MA 02761
Independent Equip. Corp.	Rte. 202N P.O.Box 460	Three Bridges, NJ 08887
KX Industries		Orange, CT
Kensington Corp.		Madison, CT
Nuclear Consulting Services Inc. (NUCON)	P.O.Box 29151	Columbus, OH 43229-1022
Penney Engineering Inc.		Mansfield, MA
Peroxidation Systems Inc.	4400 E. Broadway Suite 602	Tucson, AZ 85711-3558
Prime Carbon		Bow, NH
R H Reimer Associates		Needham, MA
Remedial Systems Inc.	56 Leonard St.	Foxboro, MA 02035
Service Tech Inc.		Swansea, MA
Tetrasolv		Plymouth, MA
Tigg Corp.	800 Old Pond Rd.	Bridgeville, PA 15017-3415
Unisorb Corp.	1310 Genoa St.	S. Houston, TX 77587
VARA International	1201 19th Place	Vero Beach, FL 32960
Waste Min Inc.		Groton, MA
Westgates Carbon Inc.	2130 Leo Ave.	Los Angeles, CA
90040-1634		
Westport Environmental Systems	251 Forge Rd.	Westport, MA 02790-0217
Wintek Corp.	RR3 Box 337 Lime Rock Lane	Califon, NJ 07830
Zimpro-Passavant Inc.	301 Military Rd.	Rothschild, WI 5474

ALGUNAS REFERENCIAS: (algunas con el URL de Internet para la página en la red mundial)

Organic Sponges for Cost-Effective CVOC Abatement, Final - July 1994, US DOE Contract No. DE-AC21-92MC29110, General Electric Corporate Research and Development

Control Techniques for Volatile Organic Compound Emissions from Stationary Sources, EPA, 453/R-92-018

OAQPS Control Cost Manual, EPA (453/B-96-001, February 1996
www.epa.gov/ttn/catc

Control of Gaseous Emissions, APTI, Course 415, Student Manual, EPA 450/2-81-005

Hydrophobic Zeolites as Adsorbents for Removal of VOC from Air, M. V. Chandak and Y. S. Lin, Dept. of Chemical Engineering, University of Cincinnati

Impregnated Activated Carbon for Environmental Protection
www.activated-carbon.com/enviro.html

Envirosense
es.epa.gov/studies/cs593.html
es.epa.gov/program/regional/state/wi/actcarbo.html

Adsorptive Recovery of Problematic Solvents
www.activated-carbon.com/probsol1.html

Gas Adsorption
chem.ufl.edu/~itl/4411L_f96/ads/ads_1.html

Steam Regeneration of Activated Carbon Beds, M. Huggahalli and J. Fair, American Institute of Chemical Engineers, Annual Meeting, November 1996

Microwave Regeneration Field Test Unit
www.me.utexas.edu/~prep/demo.html

Preparation and Characteristics of Polymer-based Large Adsorbent Particles,
Journal of Applied Polymer Science, Vol. 61, No. 11, September 1996, pp 1949-1956
www.interscience.wiley.com/jpages/0021-8995/abs/v61n11p1949.html

Microwave Regeneration of Volatile Organic Compound Adsorbents, P. Di and D. Chang, 96-RA106.2, Air & Waste Management Assn.

PADREO Vapor Treatment Process
www.nttc.edu/env/site95/demo/ongoing/purus.html

Gas-Surface Dynamics
www.ssci.liv.ac.uk/~darling/dynamica/index.html
www.ssci.liv.ac.uk/~darling/dynamica/history/ancient.html

The Desorption Process
alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2_5.htm

PE Curves & Energetics of Adsorption
alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2_4.htm

Adsorption Kinetics - The Rate of Adsorption
alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2_3.htm

How do Molecules Bond to Surfaces?
alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2_2.htm

CO₂-AIR Spreadsheets
www.epa.gov/ttn/catc

Air Compliance Advisor
www.epa.gov/ttn/catc

Institute of Clean Air Companies
www.icac.com

TECHNICAL REPORT DATA*(Please read Instructions on reverse before completing)*

1. REPORT NO. EPA-456/F-00-001	2.	3. RECIPIENT'S ACCESSION NO.
4. TITLE AND SUBTITLE Boletín Técnico Seleccionando un Sistema de Adsorción para COV: ¿ Carbón, Zeolita, o Polímeros?	5. REPORT DATE May 1999	6. PERFORMING ORGANIZATION CODE
	7. AUTHOR(S)	8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO.
9. PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS Clean Air Technology Center (MD-12) Information Transfer and Program Integration Division Office of Air Quality Planning and Standards U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711	10. PROGRAM ELEMENT NO.	11. CONTRACT/GRANT NO.
	12. SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC 27711	13. TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED Final
15. SUPPLEMENTARY NOTES For more information call the CATC Information Line at (919) 541-0800 or access the CATC Web page at www.epa.gov/ttn/catc		
16. ABSTRACT This is the Spanish version of EPA-456/F-99-004, CATC Technical Bulletin Choosing an Adsorption System for VOC: Carbon, Zeolite or Polymers. The purpose of this document is to educate people as to what an adsorption system is, how it operates, and how to choose between the different systems. Adsorption systems are used widely to control Volatile Organic Compounds (VOC) emissions. The familiarity with these systems is needed to make an informed selection of both the adsorbent and the system that uses it.		
17. KEY WORDS AND DOCUMENT ANALYSIS		
a. DESCRIPTORS	b. IDENTIFIERS/OPEN ENDED TERMS	c. COSATI Field/Group
carbon, zeolite, polymeric, thermal swing, vacuum regeneration, pressure swing, vapor concentrator, internal area, adsorption area, adsorption isotherm, mass transfer zone, steam, vacuum, incineration	air pollution control volatile organic compounds carbon adsorbents zeolite adsorbents polymeric adsorbents vapor concentrators incinerators	
18. DISTRIBUTION STATEMENT Release Unlimited, Available from the OAQPS TTN Web Page and NTIS	19. SECURITY CLASS (<i>Report</i>) Unclassified	21. NO. OF PAGES
	20. SECURITY CLASS (<i>Page</i>) Unclassified	22. PRICE